

Механизмы проводимости полианилина (обзор)

М. В. Белугин[✉], А. В. Будаев

Курский государственный университет, Курск, Россия

[✉]maksym.belugin@yandex.ru

Аннотация

Введение. Полианилин (Polyaniline – PANI) демонстрирует уникальное сочетание электрофизических свойств, стабильности и простоты синтеза, что относит его к числу наиболее перспективных проводящих полимеров. Способность к значительному изменению электропроводности в процессе протонирования открывает широкие возможности управления функциональными характеристиками материалов. Несмотря на интенсивные исследования, механизмы переноса заряда в системах на основе PANI остаются недостаточно изученными. Отсутствие единой теоретической модели, описывающей взаимосвязь между химической структурой и электронными свойствами, создает существенные ограничения для целенаправленного создания материалов на основе PANI с заданными параметрами.

Цель работы. Систематизация современных представлений о механизмах проводимости PANI с последующей разработкой комплексного подхода, объединяющего поляронную теорию и модели прыжковой проводимости.

Материалы и методы. Отбор литературных источников для анализа проводился с использованием хронологического подхода за период более 10 лет, что обусловлено необходимостью ретроспективного анализа формирования современных взглядов на механизм проводимости PANI и расширение областей его применения. Критерием формирования итогового массива источников послужило наличие в них фактических данных, соответствующих тематике исследования.

Результаты. Проведенный анализ выявил преобладание поляронного механизма проводимости протонированного PANI и недостаточность существующих теоретических моделей (прыжкового транспорта с переменной длиной прыжка и туннельных механизмов) для полного описания его электронных свойств, что требует разработки комплексного подхода, интегрирующего элементы различных теорий транспорта.

Заключение. Анализ современных теоретических подходов к описанию проводимости PANI выявил принципиальные различия в моделях прыжкового транспорта и туннельных механизмов. Отмечается, что ни одна из концепций не обладает достаточной предсказательной силой в отношении пространственного распределения переноса заряда. Полученные результаты свидетельствуют о необходимости создания синтетической теории, объединяющей методологические преимущества рассмотренных подходов. Разработка такой гибридной модели позволит обеспечить прогресс в проектировании PANI-содержащих материалов с заданными электрофизическими характеристиками.

Ключевые слова: PANI, эмеральдин, электропроводность, допирование, модель Мотта, полярон, туннелирование

Для цитирования: Белугин М. В., Будаев А. В. Механизмы проводимости полианилина (обзор) // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2026. Т. 29, № 2. С. 6–18.

doi: 10.32603/1993-8985-2026-29-2-6-18

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 15.09.2025; принята к публикации после рецензирования 19.01.2026; опубликована онлайн 30.04.2026

Conduction Mechanisms in Polyaniline (Review)

Maksim V. Belugin[✉], Artem V. Budaev

Kursk State University, Kursk, Russia

[✉] maksym.belugin@yandex.ru

Abstract

Introduction. Polyaniline (PANI) demonstrates a unique combination of electrophysical properties, stability, and ease of synthesis, making this material one of the most promising conductive polymers. Its ability to significantly alter electrical conductivity during protonation provides broad opportunities for tailoring the functional characteristics of materials. Despite extensive research, the charge transfer mechanisms in PANI-based systems remain insufficiently studied. The lack of a unified theoretical model describing the relationship between chemical structure and electronic properties poses significant limitations for the targeted development of PANI-based materials with specified parameters.

Aim. To generalize current knowledge of conduction mechanisms in PANI and to develop a comprehensive approach integrating polaron theory and hopping conductivity models.

Materials and methods. The selection of literature sources for review was conducted using a chronological approach covering a period of over 10 years, driven by the need for a retrospective analysis of the evolution of modern views on conduction mechanisms in PANI and the extension of its application areas. The criterion for forming the final set of sources was the presence of factual data relevant to the research topic.

Results. The analysis revealed the predominance of the polaron conduction mechanism in protonated PANI and highlighted the inadequacy of existing theoretical models (such as variable-range hopping and tunneling mechanisms) in providing a comprehensive description of its electronic properties. This necessitates the development of a comprehensive approach integrating elements of various transport theories.

Conclusion. The analysis of modern theoretical approaches to describing conductivity in PANI revealed fundamental differences between hopping transport and tunneling mechanism models. It is noted that none of the concepts possesses sufficient predictive power regarding the spatial distribution of charge transfer. The obtained results indicate the need to develop a synthetic theory combining the methodological advantages of the considered approaches. The creation of such a hybrid model will facilitate progress in the design of PANI-containing materials with tailored electrophysical characteristics.

Keywords: PANI, emeraldine, electrical conductivity, doping, Mott model, polaron, tunneling

For citation: Belugin M. V., Budaev A. V. Conduction Mechanisms in Polyaniline (Review). Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2026, vol. 29, no. 2, pp. 6–18.

doi: 10.32603/1993-8985-2026-29-2-6-18

Conflict of interest. The authors declare no conflicts of interest.

Submitted 15.09.2025; accepted 19.01.2026; published online 30.04.2026

Введение. Полианилин (PANI) является одним из представителей класса электропроводящих полимеров. При этом электропроводящие свойства у PANI были обнаружены более чем через столетие после его открытия (впервые был упомянут в публикации в 1862 г.) [1]. PANI является одним из наиболее распространенных и перспективных проводящих полимеров ввиду сравнительно простой методики синтеза, коммерческой доступности и высокой химической устойчивости. Благодаря этому PANI нашел практическое применение в различных сферах: электрохромные компаунды,

конденсаторы высокой емкости, топливные и энергосберегающие элементы и т. д. [2].

Так, например, для PANI и его производных характерен электрохромизм – изменение окраски при переходе из одной формы в другую в ходе обратимых окислительно-восстановительных реакций. Более подробно электрохромные свойства PANI будут рассмотрены далее. Здесь же отметим, что данный полимер под действием электрического поля способен обратимо изменять цвет. Благодаря такой особенности PANI и его производные используются в качестве материала при изготов-

лении так называемых "умных" стекол [3–5].

Также PANI, благодаря тому, что может обладать структурой с различной морфологией, используется при создании сенсоров определенного назначения. В частности, существуют модели газовых сенсоров на основе PANI [6], используемые для идентификации аммиака, гидразина, соляной кислоты, хлороформа, спиртов и т. д. Механизм, лежащий в основе функционирования подобных устройств, включает такие процессы, как допирование макромолекулы идентифицируемым газом, последующее дедопирование, восстановление макромолекулы, набухание и изменение структуры нановолокон PANI [6, 7]. В присутствии газов в PANI активируются как окислительно-восстановительные механизмы, так и механизмы протонирования/депротонирования, что позволяет использовать этот материал в качестве газового датчика. Также благодаря своей высокой биосовместимости и экологической стабильности PANI и его производные нашли применение в качестве биосенсоров [8].

Кроме того, PANI активно используется в качестве основы для композиционных материалов, на базе которых изготавливаются электроды суперконденсаторов – устройств для хранения энергии, которые отличаются от стандартных конденсаторов более высокой плотностью энергии и мощности, длительным сроком эксплуатации. Композиты на основе PANI и его производных отличаются высокой удельной емкостью материала, по значению удельной энергии они превосходят коммерческие аналоги; соответствующие устройства характеризуются стабильностью при перезарядке (до 1000 циклов) [2, 4, 9, 10]. Существенным преимуществом данных композиционных материалов является то, что они могут подвергаться повторной переработке (как следствие, большая экономичность и экологичность в сравнении с аналогами) [2].

В то же время необходимо отметить, что перенос зарядов в проводящих полимерах к настоящему моменту недостаточно изучен [11]. Недопонимание механизма проводимости PANI создает фундаментальное препятствие для предсказательного материаловедения. Без четкой модели, связывающей химическую структуру,

морфологию и температурную зависимость проводимости ($\sigma(T)$), невозможно рационально проектировать материалы, а поиск оптимальных свойств сводится к методу проб и ошибок.

Описание механизма допирования PANI.

PANI содержит в своей структуре в качестве мономерных звеньев чередующиеся восстановленные (бензоидные) и окисленные (хиноидные) молекулы N-фенилен-*n*-фенилендиамина. PANI существует в нескольких формах. Так, для основного PANI известен ряд форм: полностью восстановленный лейкомеральдин, образованный только восстановленными молекулами N-фенилен-*n*-фенилендиамина ($x = 1$, где x – доля бензоидных молекул N-фенилен-*n*-фенилендиамина в макромолекуле PANI); полностью окисленный пернигранилин ($x = 0$); эмеральдин ($x = 0.5$), представляющий собой промежуточную форму по отношению к пернигранилину и лейкоэмеральдину – примерно равное содержание окисленных и восстановленных фрагментов [12]. Также был обнаружен нигранилин, который получают частичным окислением эмеральдина ($x = 0.25$). Схема взаимных переходов между различными формами PANI приведена на рис. 1.

Отметим, что каждая форма основного PANI и соответствующие им соли имеют определенный цвет. Так, для эмеральдина характерна синяя окраска в основном состоянии и зеленый цвет в форме соли. Лейкоэмеральдин – бесцветное вещество. Пернигранилин в форме основания и соли имеет фиолетовую и синюю окраску соответственно [13]. Благодаря этому PANI нашел применение при изготовлении электрохромных устройств.

Следует отметить, что электропроводность основных форм PANI лежит в области $10^{-8} \dots 10^{-9}$ См/см. Для перевода в высокопроводящее состояние – в форму соли PANI допируют, обрабатывая кислотами в водной среде (чаще всего серной, соляной, хлорной). Разница в электропроводности между основной формой и солью для эмеральдина составляет 9–10 порядков: электропроводность эмеральдиновой соли ~ 1 См/см [14]. Механизм процесса протонирования, сопровождающегося переходом основного эмеральдина в форму соли, включает следующие стадии (рис. 2):

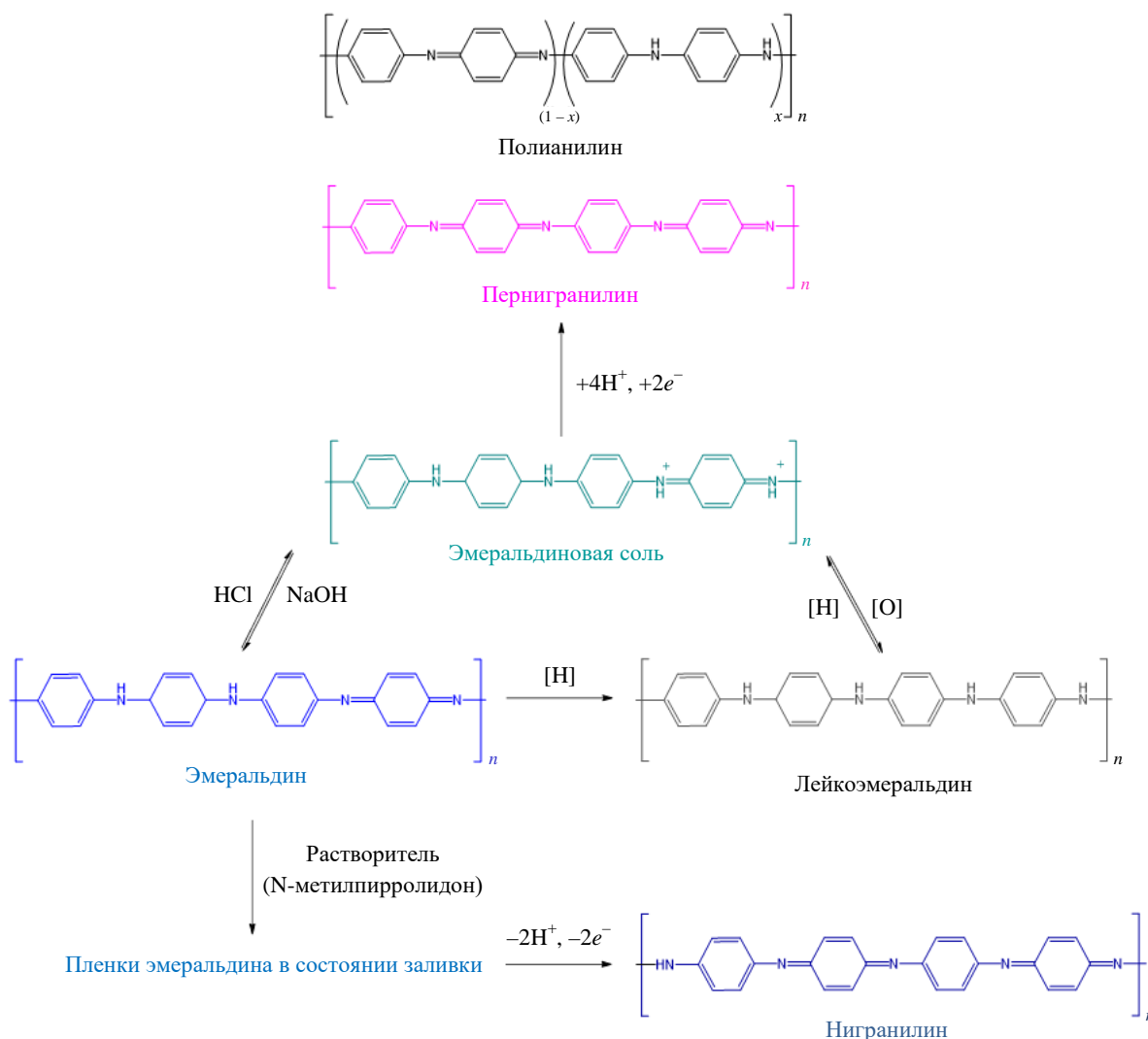


Рис. 1. Схема взаимных переходов между различными формами PANI
 Fig. 1. Scheme of mutual transitions between different forms of PANI

вначале происходит образование протонированного иминоквинона за счет протонирования иминового азота (проявляющего большую основность по сравнению с аминным азотом). Протонированный иминоквинон представляет собой бесспиновую систему, не содержащую неспаренных электронов, в рамках поляронной теории проводимости соответствующий биполярону. Данная система стабилизирована соответствующими резонансными структурами и, в меньшей степени, противоионами кислоты – допанта. Далее биполярон диспропорционирует с образованием полисемихиноидных катион-радикалов [15]. Последующая стабилизация структуры связана со стремлением к минимализации кулоновского отталкивания и делокализации электро-

нов, что приводит к образованию разделенного катион-радикала или (в рамках поляронной теории) разделенного полярона. Поляроны и биполяроны находятся в динамическом равновесии друг с другом с преимущественным содержанием в системе поляронов [12].

Влияние допирования под действием растворов соляной кислоты различной концентрации на рост электропроводности PANI наглядно продемонстрировано в [16] (рис. 3). Стоит отметить, концентрация соляной кислоты влияет на степень допирования макромолекулы PANI и, как следствие, на электропроводность, обусловленную переходом основной формы эмеральдина в биполяронную и поляронную формы. Подобный характер зависимости проводимости от степени допирования также под-

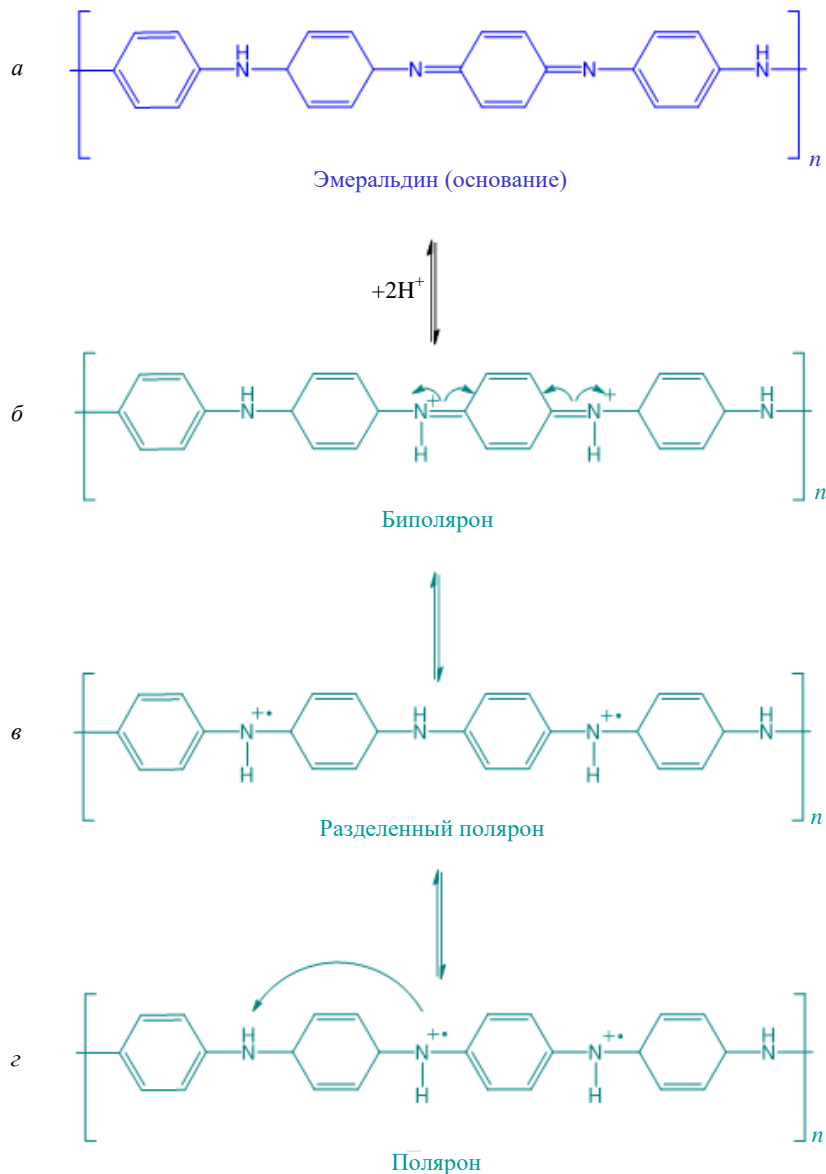


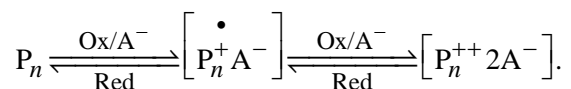
Рис. 2. Схема протонирования эмеральдинового основания (а), включающая образование соли PANI в форме биполарона (б), разделенного полярона (е) и полярона (z)

Fig. 2. Scheme of protonation of the emeraldine base (a), including the formation of a PANI salt in the form of a bipolaron (b), a separated polaron (e) and a polaron (z)

тверждает гипотезу, согласно которой в ходе протонирования происходит пространственное разделение непротонированных и протонированных доменов в макромолекуле.

Допирование PANI с точки зрения поляронной и зонной теории. При описании протонирования эмеральдинового основания была упомянута поляронная теория. Механизм переноса зарядов проводящих полимеров (к которым относится в том числе и PANI) с точки зрения поляронной теории описан в [17]. Согласно данной теории проводимость полимера обусловлена образованием поляронов и биполяронов, которые

поляризуют макромолекулы и благодаря собственной мобильности обеспечивают перенос заряда по всей длине макромолекулы. Механизм образования поляронов и биполяронов включает ряд стадий. Вначале в ходе окислительно-восстановительных реакций с участием фрагмента цепи полимера P_n и, например, вещества-допанта H^+A^- происходит образование соответствующего катион-радикала и далее возможно окисление до бикацион-радикала:



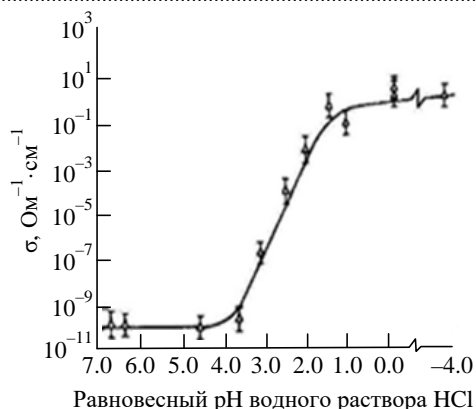
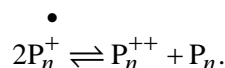


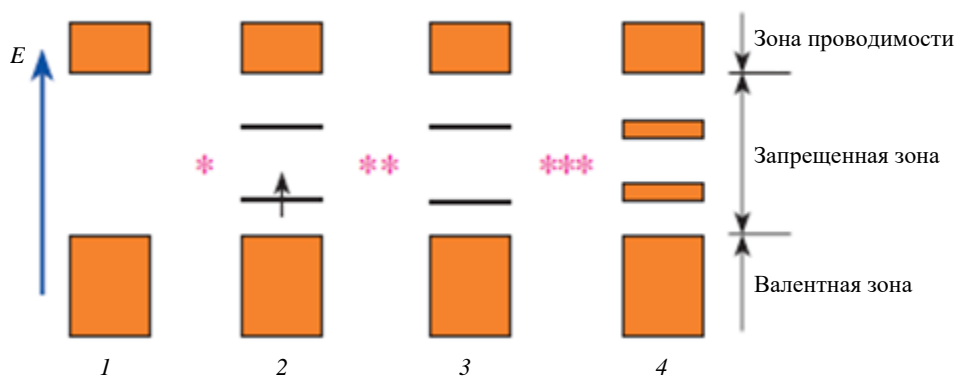
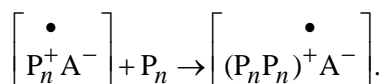
Рис. 3. Зависимость проводимости эмеральдина от pH среды [16]

Fig. 3. Dependence of emeraldine conductivity on the pH of the medium [16]

Катион-радикалы могут вступать в реакции диспропорционирования друг с другом с образованием бикатионов:



Однако катион- и бикатион-радикалы также способны образовывать комплексы переноса заряда с фрагментами макромолекул полимера, не вступившими в описанные ранее реакции ("исходные", непрореагировавшие фрагменты):



- 1 – исходный полимер
- 2 – низкий уровень окисления полимера
- 3, 4 – высокий уровень окисления полимера
- * – уровни энергии поляронов
- ** – уровни энергии биполяронов
- *** – биполярные зоны

Рис. 4. Схема возникновения уровней энергии поляронов и энергетических зон биполяронов проводящих полимеров [17]

Fig. 4. Scheme describing the emergence of polaron energy levels and energy bands of bipolarons in conductive polymers [17]

В результате данных процессов образуется частично делокализованный катион-радикал, собственно и обуславливающий поляризацию как отдельного фрагмента макромолекулы, так и макромолекулы в целом, именуемый поляроном. Образовавшийся поляронный фрагмент может подвергнуться дальнейшему окислению, что сопровождается формированием биполярона. Появление в составе макромолекулы поляронных и биполяронных фрагментов обуславливает изменение структуры самой макромолекулы и ее зонной структуры. Происходит последовательное формирование сначала уровней энергии поляронов, затем в ходе дальнейшего окисления соответствующих фрагментов уровня биполяронов. Данные энергетические уровни лежат чуть выше валентной зоны (рис. 4). По мере увеличения доли поляронных и биполяронных фрагментов в макромолекуле в результате перекрывания одиночных энергетических уровней образуются полноценные поляронные и биполяронные зоны. Совокупность данных процессов является причиной значительного увеличения проводимости полимера.

Отметим, что в отличие от представленного механизма образования поляронов и биполяронов для PANI (как было упомянуто при описании механизма допирования) переходу к поляронной форме (в сторону которой смещено ди-

намические равновесие) предшествует образованию биполярона.

Повышение электропроводности при протонном допировании PANI обусловлено появлением носителей зарядов и неспаренных электронов в соответствии с представленной ранее схемой и, как следствие, возникновением зарядового и спинового транспорта за счет внутри- и межмолекулярного переноса данных зарядов и неспаренных электронов. Зарядовый транспорт связан в первую очередь с переносом формирующихся при допировании "дырок". В то же время проводимость, обусловленная внутри- и межмолекулярным транспортом протонноионов, образующихся при диссоциации добавляемой кислоты и ассоциирующихся с положительными зарядами на всем протяжении полиарона, на 2–3 порядка меньше дырочной проводимости и достигает 10^{-2} См/см. С другой стороны, для проводящих полимеров объем макромолекулы в присутствии протонноионов может вырасти до 30 % [18]. На электропроводность PANI также сильно влияет его морфология. Его электропроводящие свойства обусловлены наличием системы полисопряженных связей и "зигзагообразным" расположением цепи PANI в одной плоскости, из-за которого возможно перекрывание облаков π -электронов ароматических групп и неподеленной пары электронов азота над и под плоскостью цепи [19].

Как было отмечено, с точки зрения поляронной теории проводимости, переход из низкопроводящего в высокопроводящее состояние связан с тем, что при допировании PANI в области запрещенной зоны между валентной зоной и зоной проводимости (ширина запрещенной зоны для эмеральдина составляет $\sim 3.5 \dots 4$ эВ) формируются дополнительные энергетические уровни [20]. Это сопровождается повышением уровня Ферми. По мере увеличения числа поляронов и биполяронов происходит локализация энергетических уровней, их перекрывание, формирование узких поляронных и биполяронных зон в запрещенной зоне и, как следствие, уменьшение ширины запрещенной зоны для эмеральдиновых солей до $1.5 \dots 1.6$ эВ [21–25].

Влияние допирования на проводимость PANI с точки зрения зонной теории рассмотре-

но в [21]. Для основной формы PANI ширина запрещенной зоны, соответствующая оптическому переходу между π -уровнем (валентная зона) и π^* -уровнем (зона проводимости), равна 3.44 эВ (рис. 5, а). Допирование PANI (например, соляной, трихлоруксусной или камфорсульфоновой кислотой) приводит к формированию поляронного уровня, расположенного на расстоянии 1.59 и 2.82 эВ относительно π - и π^* -уровней соответственно (рис. 5, б). Появление новых оптических переходов: π -уровень–поляронный уровень и поляронный уровень– π^* -уровень, с меньшим расстоянием по сравнению с исходным переходом π – π^* , обеспечивает повышение проводимости PANI [21].

Дальнейший рост проводимости PANI может быть достигнут при его допировании при высоком давлении (1...2 ГПа) (рис. 5, в). В результате приложения соответствующего давления происходит растяжение и изменение конформации макромолекул PANI, что также сопровождается делокализацией орбиталей поляронного уровня и превращением сравнительно узкой полосы соответствующего энергетического уровня в широкую поляронную зону, которая будет перекрываться с валентной зоной, т. е. в данном случае будет наблюдаться механизм проводимости, подобный металлическому [21].

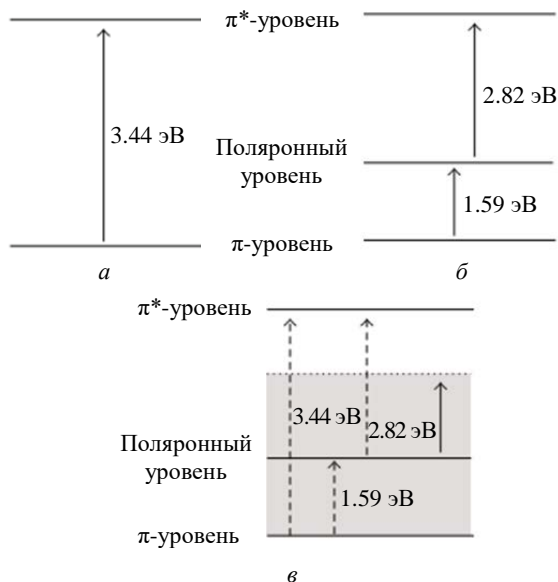


Рис. 5. Энергетическая зонная структура: а – PANI; б – допированного PANI; в – PANI, допированного при высоком давлении [21]

Fig. 5. Energy band structure: а – PANI; б – doped PANI; в – PANI doped at high pressure [21]

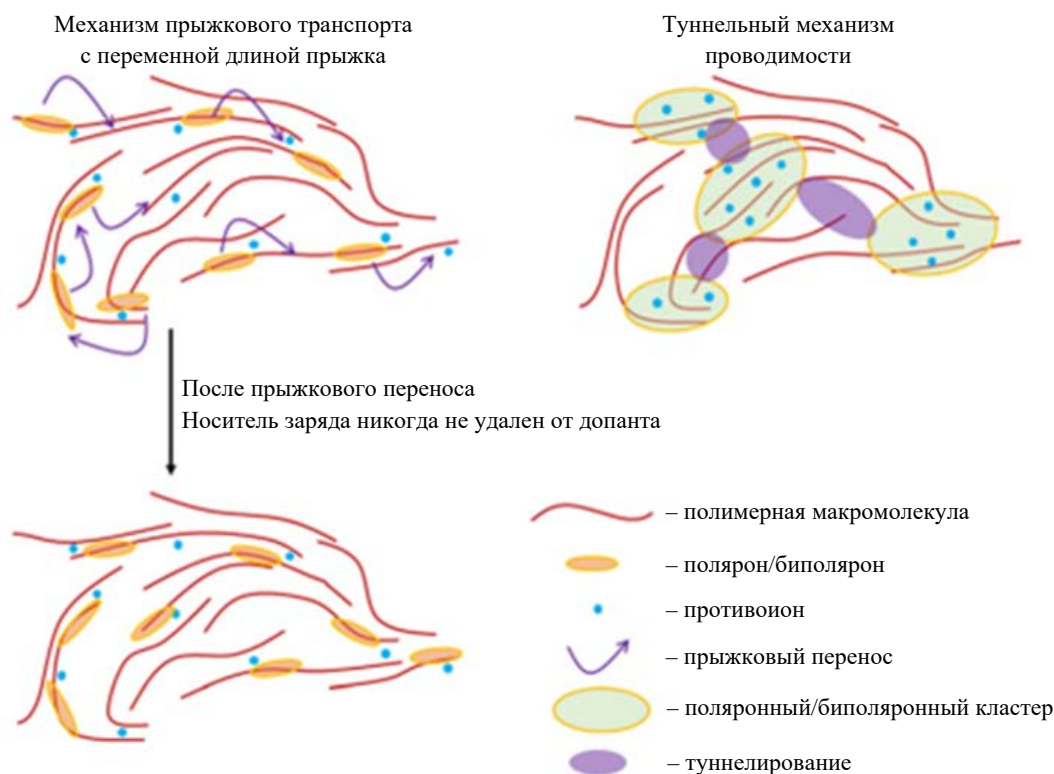


Рис. 6. Туннельный и прыжковый механизмы проводимости [26]

Fig. 6. Tunnel and hopping conduction mechanisms [26]

Подходы к описанию механизма проводимости PANI. Для описания проводимости PANI был предложен ряд теоретических моделей. В основе этих моделей лежит один из двух предельных механизмов: прыжкового транспорта с переменной длиной прыжка или туннелирование (рис. 6) [26].

Согласно теории туннельного механизма проводимости движение электронов сопоставляют с распространением плоской делокализованной волны в зоне проводимости. В рамках данной модели PANI рассматривается как гетерогенная структура. "Свободные" участки макромолекул PANI, т. е. находящиеся в некотором удалении от других фрагментов макромолекул, описаны как диэлектрические, изолированные зоны. При этом проводимость в данных участках можно характеризовать как квази-1D VRH-модель (от англ. Variable Range Hopping – перенос заряда с переменной длиной прыжка), полагая, что перенос заряда осуществляется по длине макромолекулы. Изолированная, аморфная зона занимает большую часть объема PANI. Также макромолекула PANI в некоторых об-

ластях вплотную прилегает к поверхности других макромолекул, что сопровождается межмолекулярными взаимодействиями соответствующих фрагментов и даже частичной делокализацией электронов. В данных узлах формируются своеобразные жгуты, пучки фактически металлической проводимости. В этих фрагментах перенос заряда осуществляется во всех направлениях (3D VRH-модель), т. е. в соответствии с моделью проводимости, в основе которой лежит механизм туннелирования, PANI представляет собой аморфную среду с локализованными областями металлической проводимости. Однако отметим, что большее признание получили модели, в основе которых лежит прыжковый механизм проводимости.

Для определения механизмов переноса электрических зарядов удобно исследовать температурные зависимости электропроводности σ , начиная с диапазона температур жидкого гелия и вплоть до высоких температур [27]. Ввиду неупорядоченности полупроводника была предложена модель прыжкового транспорта с переменной длиной прыжка – VRH-модель, в основе которой лежит выра-

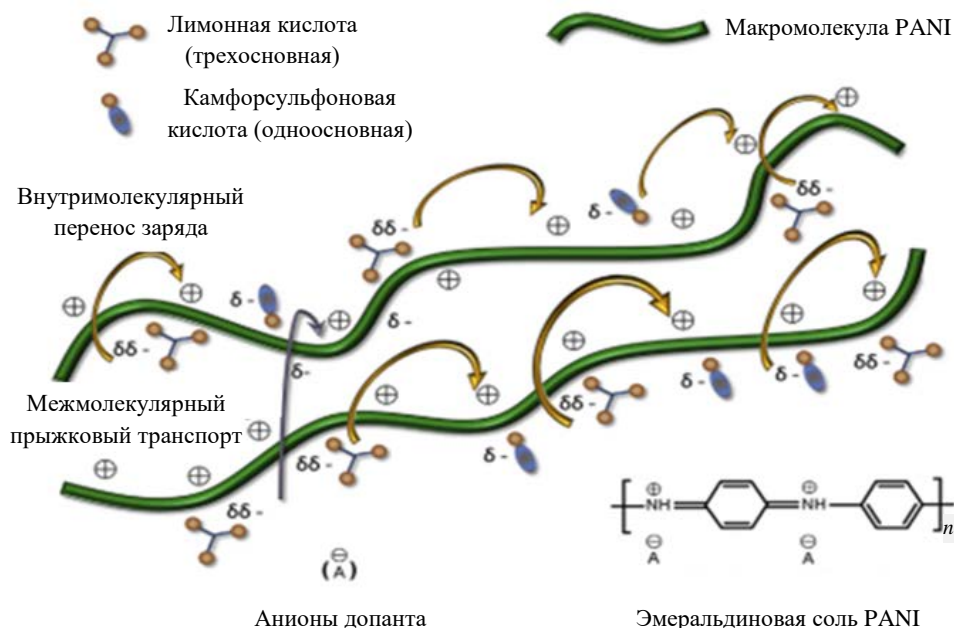


Рис. 7. Механизмы проводимости, соответствующие моделям 1D VRH и 3D VRH для допированного PANI [27]

Fig. 7. Conductivity mechanisms corresponding to the 1D VRH and 3D VRH models for doped PANI [27]

жение для зависимости электропроводности $\sigma(T)$ полупроводника от температуры T – уравнение Мотта:

$$\sigma(T) = \sigma_0 \exp\left[-(T/T_0)^\gamma\right],$$

где $\gamma = 1/(d+1)$ – степенной коэффициент для d -мерного пространства [28]. Так, для $d = 1$ $\gamma = 1/2$, и этому случаю соответствует 1D VRH-модель, т. е. предполагается, что электропроводность происходит вдоль цепи макромолекулы в одной плоскости, что сопровождается 1D-локализацией электронов. Для 3D VRH-модели, в свою очередь, $\gamma = 1/4$, и проводимость в данном случае обуславливается межмолекулярным переносом заряда и спинов. В действительности для реальных систем зачастую сочетаются оба вышеупомянутых механизма прыжковой проводимости. Так, в [29] рассматривается двойное ("синергетическое") допирование PANI под действием лимонной и камфорсульфоновой кислот (рис. 7). Данные кислоты образуют разные анионы, отличающиеся друг от друга в том числе и величиной заряда. При подобном допировании может происходить перераспределение плотности заряда в различных участках макромолекулы PANI. Изменение плотности заряда в разных частях макромолекул PANI, в свою очередь, повышает

вероятность скачкообразного переноса заряда как по внутримолекулярному, так и по межмолекулярному механизму прыжкового транспорта, сопровождающегося соответствующей миграцией данных анионов.

Тип механизма проводимости PANI зависит в том числе от соотношения внутри- и межмолекулярного переноса. Значительное влияние на внутримолекулярную проводимость PANI оказывает длина сопряжения и количество дефектов в молекулярной цепи. В свою очередь, межмолекулярный перенос определяется в том числе степенью кристалличности полимера. Для PANI с низкой долей допирующих примесей проводимость преимущественно обусловлена переносом заряда между допированными участками макромолекулы по механизму прыжкового транспорта с переменной длиной прыжка [30]. В свою очередь, при увеличении уровня допирования полимера происходит упорядочение внутрицепочечной структуры, сопровождающееся фазовой сегрегацией на кристаллические проводящие и аморфные кристаллические области, т. е. увеличение степени кристалличности [31]. При этом перенос заряда осуществляется по механизму туннелирования и прыжковой проводимости между кристаллическими областями [14].

В свою очередь, существует модель Эфроса–Шкловского, которая при описании проводимости учитывает образование кулоновской щели – энергетического зазора, небольшого скачка плотности состояний вблизи уровня Ферми из-за взаимодействий между локализованными электронами [32]. Согласно данной модели фактор присутствия кулоновской щели оказывает влияние на температурную зависимость – для всех размерностей уравнение температурной зависимости проводимости PANI значение γ должно быть равно $1/2$, т. е. одним из следствий этой теории является то, что проводимость полимера не зависит от того, как с пространственной точки зрения (внутримолекулярно или межмолекулярно) осуществляется перенос

заряда. Следует отметить, что для эмеральдиновой соли в действительности значение γ лежит в интервале $0.4 \dots 0.5$ [33].

Закключение. Таким образом, при описании механизма электропроводности PANI более применимыми моделями являются те, в основе которых лежат представления о прыжковом характере проводимости в PANI. В то же время в полной мере электропроводность PANI и его солей не соответствует ни одной из теоретических моделей (в первую очередь, ввиду неоднородности его структуры, чередования бензоидных и хиноидных мономерных звеньев, их соотношения в полимере и т. п.), и логично совместное приложение нескольких моделей для описания проводимости PANI в конкретном случае.

Список литературы

1. Electronic conduction in polymers. I. The chemical structure of polypyrrole / R. McNeill, R. Siudak, Jh. Wardlaw, D. E. Weiss // Australian J. of Chemistry. 1963. Vol. 16, № 6. P. 1056–1075. doi: 10.1071/CH9631056
2. Boeva Z. A., Sergeyev V. G. Polyaniline: Synthesis, properties, and application // Polymer Science Series C. 2014. Vol. 56, № 1. P. 144–153. doi: 10.1134/S1811238214010032
3. Large-scale fabrication of pseudocapacitive glass windows that combine electrochromism and energy storage / P. Yang, P. Sun, Zh. Chai, L. Huang, X. Cai, Sh. Tan, J. Song, W. Mai // Angewandte Chemie. 2014. Vol. 126, № 44. P. 12129–12133. doi: 10.1002/ange.201407365
4. Electrochemically stable carbazole-derived polyaniline for pseudocapacitors / M. Almtiri, T. Dowell, H. Giri, D. O Wipf, C. N. Scott // ACS Applied Polymer Materials. 2022. Vol. 4, № 5. P. 3088–3097. doi: 10.1021/acspap.1c01616
5. Mozafari M., Chauhan N. P. S. Fundamentals and emerging applications of polyaniline. Netherlands: Elsevier, 2019. 308 p.
6. Новости нанотехнологий // Нано- и микросистемная техника. 2005. № 7. С. 45–51.
7. Polyaniline nanowires-gold nanoparticles hybrid network based chemiresistive hydrogen sulfide sensor / M. D. Shirsat, M. A. Bangar, M. A. Deshusses, N. V. Myung, A. Mulchandani // Applied physics let. 2009. Vol. 94. № 8. Art. № 083502. doi: 10.1063/1.3070237
8. Highly sensitive glucose sensor based on Pt nanoparticle/polyaniline hydrogel heterostructures / D. Zhai, B. Liu, Yi Shi, L. Pan, Ya. Wang, W. Li, R. Zhang, G. Yu // ACS nano. 2013. Vol. 7, № 4. P. 3540–3546. doi: 10.1021/nn400482d
9. A novel polyquinone cathode material for rechargeable lithium batteries / L. Zhao, W. Wang, A. Wang, K. Yuan, Shi Chen, Yu. Yang // J. of power sources. 2013. Vol. 233. P. 23–27. doi: 10.1016/j.jpowsour.2013.01.103
10. Graphene/polyaniline nanofiber composites as supercapacitor electrodes / K. Zhang, L. L. Zhang, X. S. Zhao, J. Wu // Chemistry of Materials. 2010. Vol. 22, № 4. P. 1392–1401. doi: 10.1021/cm902876u
11. Лачинов А. Н., Салихов Р. Б., Бунаков А. А. Механизмы переноса заряда в тонких полимерных пленках // Изв. Российского гос. педагогического ун-та им. А. И. Герцена. 2015. Т. 5, № 13. С. 80–91.
12. Bhandari S. Polyaniline: structure and properties relationship // Polyaniline Blends, Composites and Nano-composites. 2018. P. 23–60. doi: 10.1016/B978-0-12-809551-5.00002-3
13. Stejskal J., Kratochvíl P., Jenkins A. D. The formation of polyaniline and the nature of its structures // Polymer. 1996. Vol. 37, № 2. P. 367–369. doi: 10.1016/0032-3861(96)81113-X
14. Chiang J. C., MacDiarmid A. G. ‘Polyaniline’: protonic acid doping of the emeraldine form to the metallic regime // Synthetic Metals. 1986. Vol. 13, № 1–3. P. 193–205. doi: 10.1016/0379-6779(86)90070-6
15. Polaron lattice in highly conducting polyaniline: Theoretical and optical studies / S. Stafström, J. L. Brédas, A. J. Epstein, H. S. Woo, D. B. Tanner, W. S. Huang, A. G. MacDiarmid // Physical Review Let. 1987. Vol. 59, № 13. P. 1464–1467. doi: 10.1103/PhysRevLett.59.1464
16. Polyaniline: a new concept in conducting polymers / A. G. MacDiarmid, J. C. Chiang, A. F. Richter, A. J. Epstein // Synthetic Metals. 1987. Vol. 18, № 1–3. P. 285–290. doi: 10.1016/0379-6779(87)90893-9
17. Тимонов А. М., Васильева С. В. Электронная проводимость полимерных соединений // Соросовский образовательный журн. 2000. Т. 6, № 3. С. 33–39.

18. Electron and proton conducting polymers: recent developments and prospects / G. Inzelt, M. Pineri, J. W. Schultze, M. A. Vorotyntsev // *Electrochimica Acta*. 2000. Vol. 45, № 15–16. P. 2403–2421. doi: 10.1016/S0013-4686(00)00329-7
19. Jaiswal M., Menon R. Polymer electronic materials: a review of charge transport // *Polymer international*. 2006. Vol. 55, № 12. P. 1371–1384. doi: 10.1002/PI.2111
20. Roth S., D. Carroll D. One-Dimensional Metals. 3rd ed. Weinheim: Wiley-VCH, 2014. 335 p.
21. Pressure dependence of the electrical resistivity in polymer polyaniline / D. Huang, D. Xie, J. Gao, W. Lv, Sh. Hong // *Advances in Materials Science and Engineering*. 2013. Vol. 2013, № 1. Art. № 124365. doi: 10.1155/2013/124365
22. Kwon O., McKee M. L. Calculations of band gaps in polyaniline from theoretical studies of oligomers // *The J. of Physical Chemistry B*. 2000. Vol. 104, № 8. P. 1686–1694. doi: 10.1021/jp9910946
23. Spectroscopy and defect states in polyaniline / R. P. McCall, J. M. Ginder, J. M. Leng, H. J. Ye, S. K. Manohar, J. G. Masters, G. E. Asturias, A. G. MacDiarmid, A. J. Epstein // *Physical Review B*. 1990. Vol. 41, № 8. Art. № 5202. doi: 10.1103/PhysRevB.41.5202
24. Enzymatically synthesized conducting polyaniline / W. Liu, Ja. Kumar, S. Tripathy, K. J. Senecal, L. Samuelson // *J. of the American Chemical Society*. 1999. Vol. 121, № 1. P. 71–78. doi: 10.1021/ja982270b
25. Wu C. G., Bein T. Polyaniline wires in oxidant-containing mesoporous channel hosts // *Chemistry of materials*. 1994. Vol. 6, № 8. P. 1109–1112. doi: 10.1021/cm00044a008
26. Progress in understanding structure and transport properties of PEDOT-based materials: A critical review / M. N. Gueye, A. Carella, J. Faure-Vincent, R. Demadrille, J.-P. Simonato // *Progress in Materials Science*. 2020. Vol. 108. Art. № 100616. doi: 10.1016/j.pmatsci.2019.100616
27. Rudenko R. M., Voitsihovska O. O., Poroshin V. N. Sequential change of semiconductor mechanisms of electrical conductivity in ternary PVDF/polyaniline/MWCNT nanocomposite in the wide temperature range of 4.2–340 K // *Materials Lett*. 2023. Vol. 350. Art. № 134976. doi: 10.1016/j.matlet.2023.134976
28. Жмурова А. В. Механизмы электропроводности в нанокompозитах с проводящей полимерной матрицей // *Наука и современность*. 2015. № 39. С. 103–108. doi: 10.1002/app.44703
29. Bhandari S., Khastgir D. Synergistic effect of simultaneous dual doping in solvent-free mechanochemical synthesis of polyaniline supercapacitor comparable to the composites with multiwalled carbon nanotube // *Polymer*. 2015. Vol. 81. P. 62–69. doi: 10.1016/j.polymer.2015.10.015
30. Mott N. F., Davis E. A. Electronic processes in non-crystalline materials. Oxford: Oxford University Press, 2012. 608 p. doi: 10.1080/00107514.2014.933254
31. Study on the Crystallinity of Polyaniline / W. Fosong, T. Jinsong, W. Lixiang, Zh. Hongfang, Mo Zhishen // *Molecular Crystals and Liquid Crystals*. 1988. Vol. 160, № 1. P. 175–184. doi: 10.1080/15421408808083012
32. Éfros A. L., Shklovskii B. I. Coulomb gap and low temperature conductivity of disordered systems // *J. of Physics C: Solid State Physics*. 1975. Vol. 8, № 4. P. L49. doi: 10.1088/0022-3719/8/4/003
33. Transport and EPR studies of polyaniline: A quasi-one-dimensional conductor with three-dimensional "metallic" states / Z. H. Wang, E. M. Scherr, A. G. MacDiarmid, A. J. Epstein // *Physical Review B*. 1992. Vol. 45, № 8. Art. № 4190. doi: 10.1103/PhysRevB.45.4190

Информация об авторах

Белугин Максим Вячеславович – магистр по специальности "Химия биологически активных веществ" (2024, Курский государственный университет), аспирант 2-го года обучения по специальности "Теплофизика и теоретическая теплотехника" кафедры физики и нанотехнологий Курского государственного университета, инженер-химик ООО "Курский завод композитных материалов". Автор одной научной публикаций. Сфера научных интересов – физика полупроводников; квантово-химические вычисления. Адрес: Курский государственный университет, ул. Радищева, д. 33, Курск, 305000, Россия
E-mail: maksym.belugin@yandex.ru
<https://orcid.org/0009-0004-3932-1239>

Будаев Артем Викторович – кандидат физико-математических наук (2023), младший научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории наноструктурированных сегнетоэлектрических материалов, старший преподаватель кафедры физики и нанотехнологий Курского государственного университета. Автор 40 научных работ. Сфера научных интересов – сегнетоэлектрические наноструктуры; нанокompозитные материалы; физика полупроводников. Адрес: Курский государственный университет, ул. Радищева, д. 33, Курск, 305000, Россия
E-mail: budartem@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0001-9703-3375>

References

1. McNeill R., Siudak R., Wardlaw Jh., Weiss D. E. Electronic Conduction in Polymers. I. The Chemical Structure of Polypyrrole. Australian J. of Chemistry. 1963, vol. 16, no. 6, pp. 1056–1075.
doi: 10.1071/CH9631056
2. Boeva Z. A., Sergeev V. G. Polyaniline: Synthesis, Properties, and Application. Polymer Science Series C. 2014, vol. 56, no. 1, pp. 144–153.
doi: 10.1134/S1811238214010032
3. Yang P., Sun P., Chai Zh., Huang L., Cai X., Tan Sh., Song J., Mai W. Large-Scale Fabrication of Pseudocapacitive Glass Windows That Combine Electrochromism and Energy Storage. Angewandte Chemie. 2014, vol. 126, no. 44, pp. 12129–12133.
doi: 10.1002/ange.201407365
4. Almtiri M., Dowell T., Giri H., Wipf D. O., Scott C. N. Electrochemically Stable Carbazole-Derived Polyaniline for Pseudocapacitors. ACS Applied Polymer Materials. 2022, vol. 4, no. 5, pp. 3088–3097.
doi: 10.1021/acsapm.1c01616
5. Mozafari M., Chauhan N. P. S. Fundamentals and Emerging Applications of Polyaniline. Netherlands, Elsevier, 2019, 308 p.
6. News of Nanotechnology. Nano- and Microsystem Engineering. 2005, no. 7, pp. 45–51. (In Russ.)
7. Shirsat M. D., Bangar M. A., Deshusses M. A., Myung N. V., Mulchandani A. Polyaniline Nanowires-Gold Nanoparticles Hybrid Network Based Chemiresistive Hydrogen Sulfide Sensor. Applied Physics Lett. 2009, vol. 94, no. 8, art. no. 083502.
doi: 10.1063/1.3070237
8. Zhai D., Liu B., Shi Yi, Pan L., Wang Ya., Li W., Zhang R., Yu G. Highly Sensitive Glucose Sensor Based on Pt Nanoparticle/Polyaniline Hydrogel Heterostructures. ACS Nano. 2013, vol. 7, no. 4, pp. 3540–3546.
doi: 10.1021/nn400482d
9. Zhao L., Wang W., Wang A., Yuan K., Chen Shi, Yang Yu. A Novel Polyquinone Cathode Material for Rechargeable Lithium Batteries. J. of Power Sources. 2013, vol. 233, pp. 23–27.
doi: 10.1016/j.jpowsour.2013.01.103
10. Zhang K., Zhang L. L., Zhao X. S., Wu J. Graphene/Polyaniline Nanofiber Composites as Supercapacitor Electrodes. Chemistry of Materials. 2010, vol. 22, no. 4, pp. 1392–1401.
doi: 10.1021/cm902876u
11. Lachinov A. N., Salikhov R. B., Bunakov A. A. Charge Transport Mechanisms in Thin Polymer Films. Izvestia: Herzen University J. of Humanities & Sciences. 2015, vol. 5, no. 13, pp. 80–91. (In Russ.)
12. Bhandari S. Polyaniline: Structure and Properties Relationship. Polyaniline Blends, Composites and Nano-composites. 2018, pp. 23–60.
doi: 10.1016/B978-0-12-809551-5.00002-3
13. Stejskal J., Kratochvíl P., Jenkins A. D. The Formation of Polyaniline and the Nature of Its Structures. Polymer. 1996, vol. 37, no. 2, pp. 367–369.
doi: 10.1016/0032-3861(96)81113-X
14. Chiang J. C., MacDiarmid A. G. ‘Polyaniline’: Protonic Acid Doping of the Emeraldine Form to the Metallic Regime. Synthetic Metals. 1986, vol. 13, no. 1–3, pp. 193–205.
doi: 10.1016/0379-6779(86)90070-6
15. Stafström S., Brédas J. L., Epstein A. J., Woo H. S., Tanner D. B., Huang W. S., MacDiarmid A. G. Polaron Lattice in Highly Conducting Polyaniline: Theoretical and Optical Studies. Physical Review Lett. 1987, vol. 59, no. 13, pp. 1464–1467.
doi: 10.1103/PhysRevLett.59.1464
16. MacDiarmid A. G., Chiang J. C., Richter A. F., Epstein A. J. Polyaniline: a New Concept in Conducting Polymers. Synthetic Metals. 1987, vol. 18, no. 1–3, pp. 285–290.
doi: 10.1016/0379-6779(87)90893-9
17. Timonov A. M., Vasilyeva S. V. Electron Conductivity of Polymeric Compounds. Soros Educational J. 2000, vol. 6, no. 3, pp. 33–39. (In Russ.)
18. Inzelt G., Pineri M., Schultze J. W., Vorotyntsev M. A. Electron and Proton Conducting Polymers: Recent Developments and Prospects. Electrochimica Acta. 2000, vol. 45, no. 15–16, pp. 2403–2421.
doi: 10.1016/S0013-4686(00)00329-7
19. Jaiswal M., Menon R. Polymer Electronic Materials: A Review of Charge Transport. Polymer International. 2006, vol. 55, no. 12, pp. 1371–1384.
doi: 10.1002/PI.2111
20. Roth S., D. Carroll D. One-Dimensional Metals. 3rd ed. Weinheim, Wiley-VCH, 2014, 335 p.
21. Huang D., Xie D., Gao J., Lv W., Hong Sh. Pressure Dependence of the Electrical Resistivity in Polymer Polyaniline. Advances in Materials Science and Engineering. 2013, vol. 2013, no. 1, art. no. 124365.
doi: 10.1155/2013/124365
22. Kwon O., McKee M. L. Calculations of Band Gaps in Polyaniline from Theoretical Studies of Oligomers. The J. of Physical Chemistry B. 2000, vol. 104, no. 8, pp. 1686–1694.
doi: 10.1021/jp9910946
23. McCall R. P., Ginder J. M., Leng J. M., Ye H. J., Manohar S. K., Masters J. G., Asturias G. E., MacDiarmid A. G., Epstein A. J. Spectroscopy and Defect States in Polyaniline. Physical Review B. 1990, vol. 41, no. 8, art. no. 5202.
doi: 10.1103/PhysRevB.41.5202
24. Liu W., Kumar Ja., Tripathy S., Senecal K. J., Samuelson L. Enzymatically Synthesized Conducting Polyaniline. J. of the American Chemical Society. 1999, vol. 121, no. 1, pp. 71–78.
doi: 10.1021/ja982270b
25. Wu C. G., Bein T. Polyaniline Wires in Oxidant-Containing Mesoporous Channel Hosts. Chemistry of Materials. 1994, vol. 6, no. 8, pp. 1109–1112.
doi: 10.1021/cm00044a008
26. Gueye M. N., Carella A., Faure-Vincent J., Demadrille R., Simonato J.-P. Progress in Understanding Structure and Transport Properties of PEDOT-

Based Materials: A Critical Review. Progress in Materials Science. 2020, vol. 108, art. no. 100616.

doi: 10.1016/j.pmatsci.2019.100616

27. Rudenko R. M., Voitsihovska O. O., Poroshin V. N. Sequential change of semiconductor mechanisms of electrical conductivity in ternary PVDF/polyaniline/MWCNT nanocomposite in the wide temperature range of 4.2–340 K. Materials Let. 2023, vol. 350, art. no. 134976.

doi: 10.1016/j.matlet.2023.134976

28. Zhmurova A. V. Mechanisms of Electrical Conductivity in Nanocomposites with a Conductive Polymer Matrix. Science and Modernity. 2015, no. 39, pp. 103–108. (In Russ.)

doi: 10.1002/app.44703

29. Bhandari S., Khastgir D. Synergistic Effect of Simultaneous Dual Doping in Solvent-Free Mechanochemical Synthesis of Polyaniline Supercapacitor Comparable to the Composites With Multiwalled Carbon Nanotube. Polymer. 2015, vol. 81, pp. 62–69.

doi: 10.1016/j.polymer.2015.10.015

30. Mott N. F., Davis E. A. Electronic Processes in Non-Crystalline Materials. Oxford, Oxford University Press, 2012, 608 p.

doi: 10.1080/00107514.2014.933254

31. Fosong W., Jinsong T., Lixiang W., Hongfang Zh., Zhishen Mo. Study on the Crystallinity of Polyaniline. Molecular Crystals and Liquid Crystals. 1988, vol. 160, no. 1, pp. 175–184.

doi: 10.1080/15421408808083012

32. Éfros A. L., Shklovskii B. I. Coulomb Gap and Low Temperature Conductivity of Disordered Systems. J. of Physics C: Solid State Physics. 1975, vol. 8, no. 4, p. L49.

doi: 10.1088/0022-3719/8/4/003

33. Wang Z. H., Scherr E. M., MacDiarmid A. G., Epstein A. J. Transport and EPR Studies of Polyaniline: a Quasi-One-Dimensional Conductor with Three-Dimensional "Metallic" States. Physical Review B. 1992, vol. 45, no. 8, art. no. 4190.

doi: 10.1103/PhysRevB.45.4190

Information about the authors

Maksim V. Belugin, Master's degree in Chemistry of Biologically Active Substances (2024, Kursk State University), 2-year Postgraduate Student in "Thermal physics and theoretical heat engineering" of the Department of Physics and Nanotechnology of Kursk State University, chemical engineer of Kursk Composite Materials Plant LLC. The author of 1 scientific publication. Area of expertise: semiconductor physics; quantum-chemical calculations.

Address: Kursk State University, 33, Radishcheva St., Kursk 305000 Russia

E-mail: maksym.belugin@yandex.ru

<https://orcid.org/0009-0004-3932-1239>

Artem V. Budaev, Cand. Sci. (Phys.-Math.) (2023), Junior Researcher of the Research Laboratory of Nanostructured Ferroelectric Materials, Senior Lecturer of the Department of Physics and Nanotechnology of Kursk State University. The author of 40 scientific publications. Area of expertise: ferroelectric nanostructures, nanocomposite materials; semiconductor physics.

Address: Kursk State University, 33, Radishcheva St., Kursk 305000 Russia

E-mail: budartem@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0001-9703-3375>
